

# 나노인덴테이션 공정을 이용하여 극미세 패턴을 제작하기 위한 나노변형의 유한요소해석(II)

이정우\*, 윤성원#, 감충길\*\*

## Finite Element Analysis of Nano Deformation for Hyper-fine Pattern Fabrication by Application of Nanoindentation Process (II)

Jung Woo Lee\*, Sung Won Youn# and Chung Gil Kang\*\*

### ABSTRACT

In this study, to achieve the optimal conditions for mechanical hyper-fine pattern fabrication process, deformation behavior of the materials during indentation was studied with numerical method by ABAQUS S/W. Polymer (PMMA) and brittle materials (Si, Pyrex glass) were used as specimens, and forming conditions to reduce the elastic recover and pile-up were proposed. The indenter was modeled a rigid surface. Minimum mesh sizes of specimens are 1-10nm. Comparison between the experimental data and numerical result demonstrated that the finite element approach is capable of reproducing the loading-unloading behavior of a nanoindentation test. The result of the investigation will be applied to the fabrication of the hyper-fine pattern.

Key Words : Nanoindentation(나노압입), Hyper-fine pattern(극미세 패턴), Nano-Scratch(나노스크래치), Pile-up(버), Elastic recovery(탄성회복)

### 기호설명

- $\alpha$  = Half angle of nanoindenter tip (Cone shape)
- $\beta$  = Half angle of nanoindenter tip (Berkovich shape)
- R = radius of Sphere
- Radius = Tip radius

### 1. 서론

나노인덴테이션 장비는 원래 벌크재료와 얇은 박막의 기계적 특성 즉 탄성계수와 경도를 측정하고, 또한 스크래치 공정을 이용하여 마찰계수를 측정하는 것이 목적이다<sup>1-2</sup>. 여기서 나노인덴테이션의 스크래치 공정은 수 nm의 두께를 가진 박막까지 마찰계수 측정이 가능하다. 이 공정을 응용하여 극미세 패턴을 제작하려고 한다.

현재 가장 많이 사용되고 있는 미세패턴 및 구조물 제작기술로서는 LIGA, 광학이나 고에너지 이온빔, X선 등을 이용하는 리소그래피 기술을 들

접수일: 2003년 4월 17일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

\* 부산대학교 정밀기계공학과

# 교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail: wonny@hitel.net, Tel: (051) 510-1455

\*\* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

수 있다. 이러한 리소그라피 기술들은 자외선, X선, 레이저 등의 광시스템 및 aligner 등 시설에 대한 초기 투자비용이 너무 높고, 공정특성상 다단계의 마스크 공정과 에칭공정 중 복잡한 공정을 필요로 하며 제작시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 패턴변경 등 디자인 변화를 위해서는 새로 마스크를 제작해야 하는 문제가 있어 단품중 생산에는 적합하나 다품중 생산에는 부적합하다. 또한, 가공 가능한 재료가 대부분 실리콘 기반재료에 한정되어 있다는 단점을 가진다. 리소그라피 기술에 의하여 제작 가능한 최소선폭의 물리적 한계로 인하여 원자력현미경(AFM)의 기계적 방법을 이용한 반도체 표면 위에 극미세 패턴을 제작하기 위한 많은 실험들이 행해져 왔다.<sup>3,4</sup>

극미세 패턴의 제작공정에서 나노인덴테이션의 스크래치 공정을 이용할 경우 원자력현미경을 이용했을 때에 비하여 수직하중의 조절범위가 넓으며(max. 1kg), 가공면이 넓고(4 inch<sup>2</sup>), 수평하중의 조절이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 공정의 cycle time 이 느리고 가공시 발생하는 탄성회복이나 버(pile-up)가 심하여 패턴의 재현성과 정밀도가 나쁘다는 단점이 있다.<sup>5</sup>

저자는 나노변형에 필요한 소재의 변형거동을 유한요소법으로 해석하여 실험데이터와 비교 검토하였고 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 그러나 2차원해석에서는 3차원적 미세구조체의 변형거동을 예측할 수 없었다<sup>6</sup>. 따라서 본 연구는 나노인덴테이션 스크래치 공정으로 극미세 패턴을 제작하기 전 나노인덴테이션 압입 공정의 3차원 유한요소해석을 이용하여 소재의 변형을 예측 보다 나은 패턴 제작을 위한 기초 연구이다. 3차원 해석은 2차원 해석에 비해 시간은 많이 걸리지만 입체적으로 버를 프로파일하여 소재의 정확한 변형을 알 수 있는 장점이 있다. 그리고 차후에 조사할 스크래치 해석의 스크래치방향이나 하중을 결정할 수 있는 토대가 될 것이다. 나노인덴테이션 스크래치 공정은 압입, 스크래치, 언로딩 순서로 진행된다. 여기서 압입 공정이 먼저 이루어지기 때문에 압입 공정의 소재거동을 우선적으로 연구하였다.

유한요소해석은 FEM 패키지인 ABAQUS 6.2 를 사용하였고, 압입 공정시 생기는 탄성회복이나 버 발생을 예측하기 위해 팁형상과 압입깊이, 팁라운드, 소재의 변화를 변수로 하여 해석하였다. 본 연구결과는 나노인덴테이션의 스크래치 기능을 활용

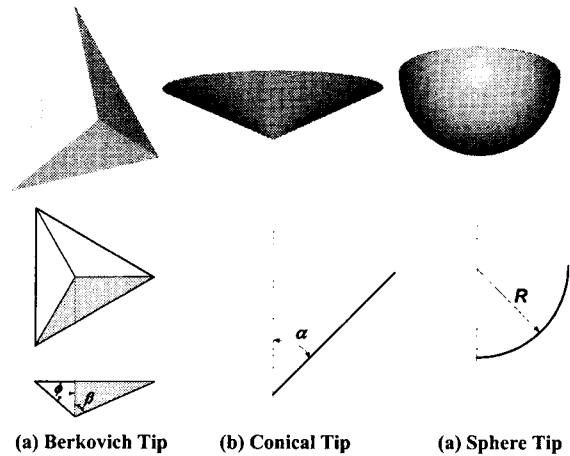


Fig. 1 Schematic of indenters

하여 극미세 패턴을 제작할 때 기초연구로서 활용되어질 것이다.

## 2. FEM 모델링

### 2.1.3 3차원 나노인덴테이션 모델

본 연구에서는 Berkovich 형과 콘형, 구형의 세 종류의 팁을 사용하고, 실리콘 웨이퍼 100 과 파 이렉스 글라스 7740, 폴리머인 PMMA 재료를 사용하여 3 차원 유한요소해석을 했다. 이 해석은 소재 종류에 따른 탄성회복의 영향과 팁형상 변화에 따른 탄성회복의 영향, 팁의 압입깊이 변화에 따른 탄성회복의 영향, Berkovich 팁 라운드 변화에 따른 탄성회복의 영향을 조사하였다.

Fig. 1 은 팁들의 3 차원 형상으로써 Nano-indenter XP(MTS) 매뉴얼<sup>5</sup>의 치수정보를 참고하여 모델링하였다. Fig. 1(a)는 Berkovich 팁으로써  $\beta = 12.95^\circ, \phi = 65.3^\circ$ 이다. Fig. 1(b)는 콘팁으로써  $\alpha = 65^\circ$ 이고 (c)는 구형팁으로써  $R = 2\mu\text{m}$ 이다. 해석에는 모델링된 팁을 surface 정보만 가지고 있는 iges 파일로 변화하여 ABAQUS 6.2/CAE 로 인터페이스하여 사용했다. 그리고 시편은 모델링하기 쉬운 회전체로 하였다. 시편의 반지름은  $10\mu\text{m}$ 이고, 높이는  $5\mu\text{m}$ 이다. 콘이나 구형팁일 경우는 축대칭이 가능하므로 1/6 축대칭으로 모델링하였다.

Fig. 2 은 자세한 모델링 정보와 해석에 사용할 Mesh 정보, 경계조건을 알 수 있다. Fig. 2(a)는 Berkovich 팁해석으로써 축대칭이 어려워 전체로

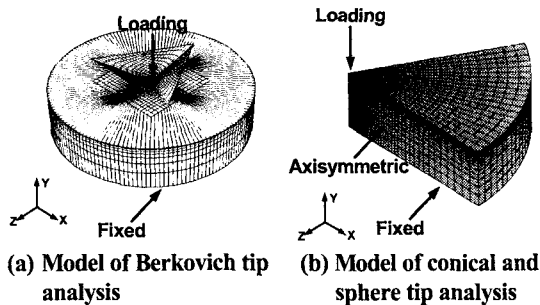


Fig. 2 Finite element model

모델링하였고, Mesh 는 12320 개 8 노드 reduced integration 요소(C3D8R element type)와 14728 개 노드를 사용하였다. 또한 팁이 압입되는 부분만 Mesh 크기를 작게 한 Local Mesh 를 사용하였고, 시편 중심에서 멀어질수록 해석에 거의 영향을 미치지 않으므로 Mesh 를 크게 하였다. 팁은 663 개 강체요소(R3D4 element type)를 사용한 강체이다. 시편의 바닥은 회전 및 이동의 6 자유도를 완전고정하였고, 팁은 Y 축이동만 가능하게 하였다.

Fig. 2(b)는 콘과 구형 팁 해석으로써 축대칭이 가능하므로 1/6 축대칭으로 모델링하였다. 이 모델은 축대칭 조건과 Mesh 정보만을 제외하고는 Fig. 2(a)와 같다. Mesh 는 6950 개 8 노드 요소(C3D8R element type)와 7500 개 노드를 사용하였고, 팁은 120 개 강체요소(R3D4 element type)를 사용한 강체이다. Mesh 의 최소 크기는 약 1~10 nm 정도이다.<sup>7</sup>

나노인덴테이션 공정 해석을 위해서 팁을 Master, 시편을 Slave 로 한 접촉조건을 사용하였고, 접촉에 대한 마찰계수를 해석의 편리를 위해 1 로 가정하였다. 그리고 이 해석은 로딩과 언로딩의 2 단계로 해석하였고, ABAQUS/Standard 를 이용한 탄소성 해석을 하였다.

Table 1 은 나노인덴테이션 공정해석에 입력될 기계적 성질이다. 탄성계수와 경도는 나노인덴테이션 실험으로 구한 값들이고, 항복강도와 프와송

비는 참고문헌을 인용하였다. Table 1 의 세가지 재료 중 실리콘은 반도체공정에 많이 사용되고, PMMA 는 독성이 없고 가격이 저렴하므로 바이오 분야에 많이 사용된다. 최근에는 나노패턴제작에 폴리머재료를 이용하여 연구가 되어지고 있다.<sup>8</sup> 파이렉스 글라스 7740(Pyrex glass 7740)는 MEMS 부품을 만들 때 실리콘 재료를 본딩하는데 사용한다.

팁 형상 변화에 따른 탄성회복의 영향을 조사하는 해석에는 실리콘 재료를 사용하여 Berkovich 와 콘, 구형 팁으로 100 nm 압입하였다. 그리고, 소재 종류에 따른 탄성회복의 영향에는 Berkovich 팁을 이용하여 Table 1 의 세가지 재료에 100 nm 압입하였다. 팁의 압입깊이 변화에 따른 탄성회복의 영향은 콘 팁을 사용하여 실리콘에 각각 100 nm, 200 nm, 300 nm 압입하였고, Berkovich 팁 라운드 변화에 따른 탄성회복의 영향은 Berkovich 팁 라운드를 각각 40 nm, 100 nm, 200 nm 으로 모델링하여 실리콘에 100 nm 압입하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1.3 차원 나노인덴테이션 해석의 검증

해석의 검증은 나노인덴테이션의 캘리브레이션 사용되는 시편인 Fused Silica로 검증하였다. Table 1의 Fused Silica 물성치를 해석시 입력하였고 탄성계수와 경도는 나노인덴테이션 실험으로 구하였다.

Fig. 3은 Fused silica 재료에 깊이 100 nm 압입시 2차원, 3차원 유한요소 해석결과와 나노인덴테이션 실험결과를 비교한 것이다. Fig. 4는 PMMA 재료에 깊이 300 nm 압입시 3차원 유한요소해석결과와 나노인덴테이션 실험결과를 비교한 하중변위 그래프이다. Fig. 5는 실리콘 재료에 100 nm 압입하였을 때 유한요소해석에서 생기는 버의 프로파일과 인덴테이션 실험한 다음 AFM으로 측정한

Table 1 Elastic and plastic properties of silicon<sup>9</sup>, PMMA<sup>10</sup> and Pyrex glass, Fused silica<sup>11</sup>

Materials	Young's modulus (Gpa)	Hardness(Gpa)	Yield Strength(Gpa)	Poisson's ratio
Silicon	168±2	13±1	7	0.278
Pyrex glass 7740	63±2	10±0.5	6.1	0.17
PMMA	3.0±0.5	0.30±0.05	0.138	0.40
Fused Silica	72±2	9.5±0.5	7.1	0.180

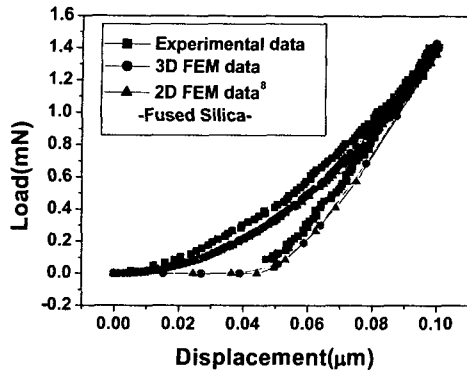


Fig. 3 Comparison of finite element analysis result with experimental data for fused silica material

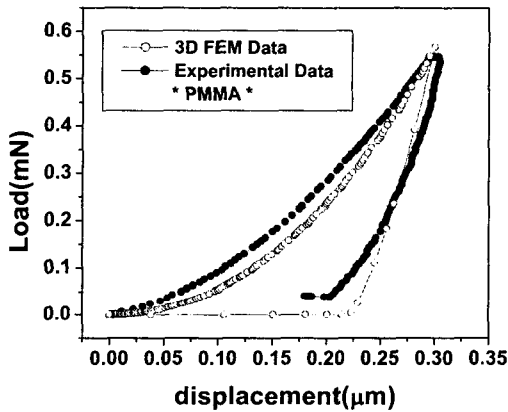


Fig. 4 Comparison of finite element analysis result with Experimental data for PMMA material

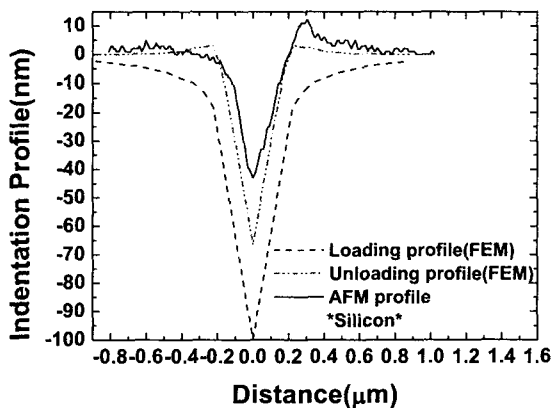


Fig. 5 Comparison of FEM profile with experiment profile for Silicon material (Depth 100 nm)

프로파일을 비교한 결과이다.

Fig. 3에서 Fig. 5의 결과들을 보면 약간의 오차가 생기는 것을 알 수 있다. 그 이유는 유한요소 해석 시 팁라운드와 표면 거칠기를 0으로 가정하여 해석하였으나 실제 실험에서 존재하였고, 가공경화 또한 고려하지 않았기 때문이다. 이렇게 해서 유한요소 해석 모델의 정당성을 검증하였다.

### 3.2 소재에 대한 나노인덴테이션

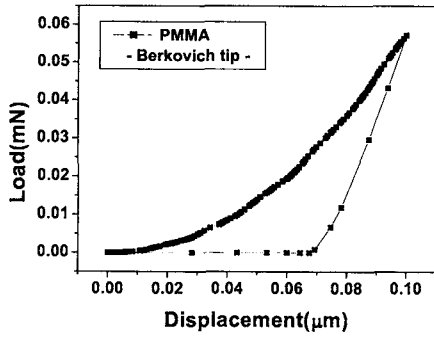
실리콘, PMMA 와 파이렉스 글라스 7740 소재에 대하여 깊이 100 nm 를 압입하였을 때 하중-변위의 관계를 조사하였다. 하중-변위 그래프를 이용하여 경도 및 탄성계수 등을 계산하는 것이 목적이지만 본 연구에서는 극미세 패턴의 가공 정밀도 문제를 예측하기 위하여 탄성회복과 버를 조사하였다.

Berkovich 팁을 사용하여 100 nm 압입 하였을 때 세가지 소재에 대한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6(a)는 PMMA 의 하중-변위 그래프이다. 로딩시 많은 하중을 요하지 않음을 알 수 있었고, 총 압입 깊이에 약 24 % 정도 탄성회복됨을 알 수 있었다. Fig. 6(b)는 실리콘과 파이렉스 글라스 7740 의 하중-변위 결과로써 압입깊이에 대한 하중을 예측할 수 있었다. 압입깊이에 대한 하중은 스크래치 공정시 입력하중으로 이용할 것이다. 실리콘의 탄성회복은 총 압입 깊이에 26 % 정도임을 알 수 있고, 파이렉스 글라스 7740 은 총 압입 깊이에 약 50 % 정도 탄성회복 됨을 알 수 있다.

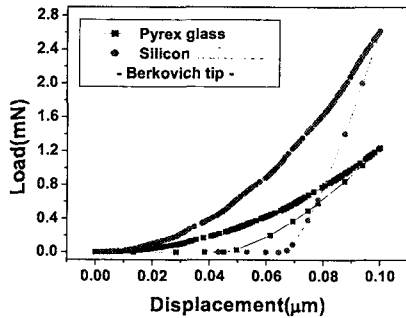
Fig. 7 은 로딩과 언로딩시 각 시편에 생기는 응력 분포를 나타낸 것이다. 왼쪽은 로딩, 오른쪽은 언로딩의 응력 분포이다. 언로딩의 응력 분포를 보면 탄성회복을 시각적으로 볼 수가 있다. 재료마다 탄성회복의 차이를 보이는 것은 탄성계수 대 항복강도 비( $E/\sigma_y$ )가 작을수록 탄성회복이 커지기 때문이다<sup>9</sup>. 실리콘, PMMA, 파이렉스 글라스 7740 의  $E/\sigma_y$  는 각각 24, 25.3, 10.3 이다. 따라서 10.3 인 파이렉스 글라스 7740 이 탄성회복에서 크게 나타난다.

Fig. 8 은 실리콘, 파이렉스 글라스 7740, PMMA 에 100 nm 압입시 생기는 버를 프로파일한 그래프이다. 이 결과 알 수 있는 것은 탄성회복이 클수록 버의 높이가 적어짐을 알 수 있다. 즉, 버의 높이와 탄성회복은 반비례관계를 알 수 있었다.

나노인덴테이션 스크래치공정 시 입력해야 할



(a) Load-displacement curve of PMMA



(b) Load-displacement curve of Silicon and Pyrex glass

Fig. 6 Load-displacement curve for each materials (Depth 100 nm indentation)

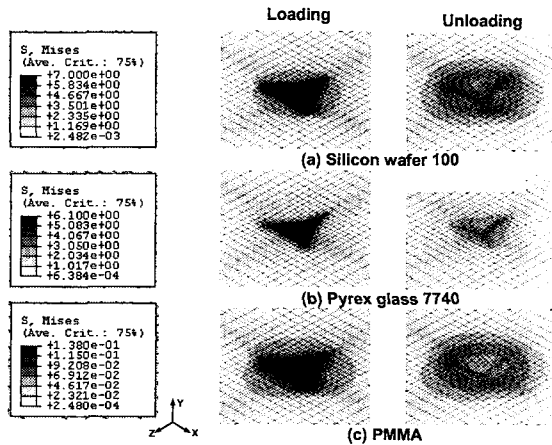


Fig. 7 Von-mises stress distribution of each materials

수치는 하중과 스크래치 길이인데 해석 결과들을 토대로 소재에 따른 하중을 예측할 수 있고, 또한 이 하중으로 스크래치를 할 경우 소재의 탄성회복과 버까지 예측할 수 있다. 즉 나노패턴 제작시

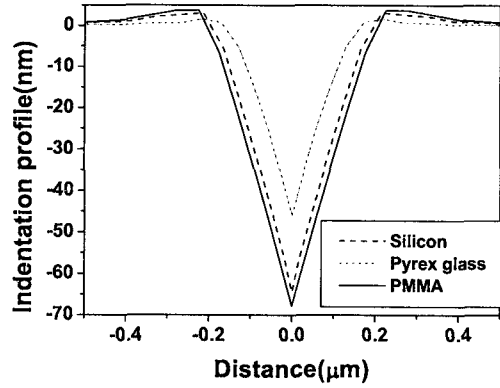


Fig. 8 Indentation profile of each materials

정밀하게 깊이나 버 제어가 가능하다는 것이다.

### 3.3 팁형상에 대한 나노인덴테이션

팁형상 즉 콘형상( $\alpha=65^\circ$ ), 구형상, Berkovich 형상을 이용하여 실리콘 소재의 특성을 조사하였다. 압입 깊이는 100 nm 로 하였으며 정확한 팁의 형상은 Fig. 1 에서 보여주고 있다.

Fig. 9 는 팁형상에 따른 실리콘 시편의 하중-변위 그래프를 나타낸 것이다. 구형상이 콘형상, Berkovich 형상보다 하중이 높고, 탄성회복 또한 심하다. 콘형상, Berkovich 형상, 구형상의 탄성회복은 각각 26%, 32%, 53%이다.

Fig. 9 의 결과를 보면 구형상 팁은 100 nm 압입할 때 다른 팁보다 많은 하중이 필요하고, 탄성회복도 크기 때문에 정밀한 패턴이나 구조물을 제작 때는 구형상을 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 예측된다. 또한 탄성회복이 적은 콘팁을 사용하는 것이 정밀한 패턴을 제작할 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 콘형상이나 Berkovich 형상에 팁 라운드는 실제로 존재하고, 그 팁 끝부분은 구형상이 된다. 보통 Berkovich 팁은 40-500 nm 의 팁 라운드를 가진다. 그래서 깊이 100 nm 이하의 패턴제작 시에는 가능한 팁 라운드를 작게 하는 것이 나노패턴 제작에 유리함을 알 수 있었다.

### 3.4 팁라운드에 대한 나노인덴테이션

팁 라운드 변화에 대한 소재의 특성을 알아보기 위해서 Berkovich 형상의 뾰족한 부위에 라운드를 40 nm, 100 nm, 200 nm 로 변화시켜 해석하였다. 압입 깊이는 100 nm 이며 라운드의 크기에 따라서 탄성회복 이 얼마만큼 생기는지를 예측하였다.

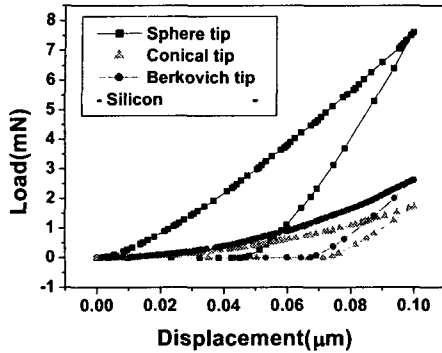


Fig. 9 Load-displacement curves on silicon with different tip geometry

Fig. 10 은 팁 라운드에 따른 하중-변위 그래프 로써 팁 라운드가 커질수록 하중이 증가하고, 탄 성회복도 증가함을 알 수 있었다. Fig. 10 의 그래 프는 Lu 와 Bogy<sup>9</sup> 결과와 유사한 형태를 보이고 있고, Indentation Size Effect(ISE)에 대한 현상을 볼 수 있다. 10 nm 이하로 압입하게 되면 팁 라운드 때문에 투영면적이 구형이 되어 탄성계수나 경도 값이 증가하고, 탄성회복도 심하게 일어난다. 그리고 Berkovich 팁은 팁끝 뿐만 아니라 팁 모서리에도 라운드가 존재하므로 2 차원해석보다 그래프의 기울기가 크게 되었다.

Fig. 11 은 팁 라운드에 따른 로딩, 언로딩시 발 생하는 응력분포이다. 팁 라운드가 커질수록 시편 의 응력분포가 점점 넓어짐을 알 수 있다. 그 이 유는 같은 깊이 압입시 팁 라운드가 커지면 압입 한 형태는 구형에 가까워지고, Berkovich 팁의 모든

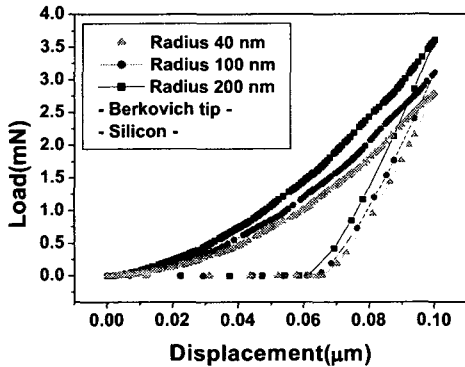


Fig. 10 Load-displacement curves on silicon with different tip radius

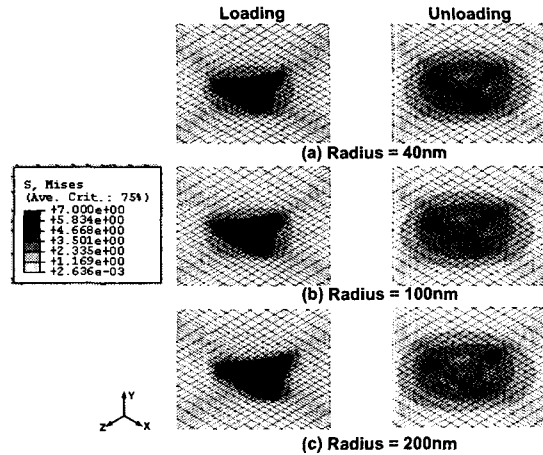


Fig. 11 Von-mises stress distribution on silicon with different tip radius

팁 모서리 부분에 라운드가 존재하므로 압입 접촉 면적이 증가하기 때문이다. 접촉면적이 증가하면 응력분포는 시편 주위로 분산되어 소성변형이 감소하고 탄성회복은 증가하게 된다.

Fig. 10, Fig. 11 의 결과들을 보면 팁에 라운드가 적을수록 탄성회복이 적고, 적은 하중으로 보다 정밀한 패턴 제작이 가능하다고 판단된다.

### 3.5 압입깊이 변화에 대한 나노인덴테이션

압입 깊이에 따른 실리콘 소재의 특성 즉 탄 성회복과 버를 조사해 보았다. 팁은 콘형을 사용 하였고, 압입 깊이는 100, 200, 300 nm 로 하였다.

Fig. 12 는 실리콘 소재에 콘팁을 사용한 압입 깊이의 변화에 따른 하중-변위 그래프를 나타낸 것이다. 각 깊이에 대한 탄성회복을 보면 100 nm 일 때 약 32 %, 200 nm 일 때 약 30 %, 300 nm 일 때 약 27 %의 탄성회복이 일어남을 알 수 있다. 압입이 깊어 질수록 점점 탄성회복력이 감소하게 됨을 알 수 있었다. 그 이유는 압입 하중이 증가 해야만 압입 깊이가 증가하고, 하중이 점점 증가 하면 시편이 소성변형을 그만큼 많이 일으키기 때문이다. 압입 하중이 더 증가하면 시편표면에 크랙이 발생하게 된다.

Fig. 13 은 압입깊이 변화에 대한 버를 프로파 일한 그래프이다. 압입 깊이가 깊어질수록 버의 높이가 커짐을 알 수 있다. 이것은 탄성회복이 감소하면 버의 높이가 증가한다는 것이다.

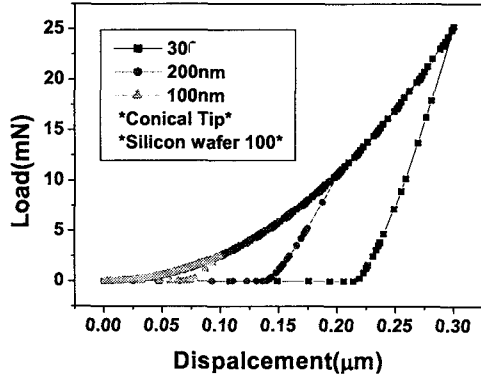


Fig. 12 Load-displacement curves on silicon with different indentation depth

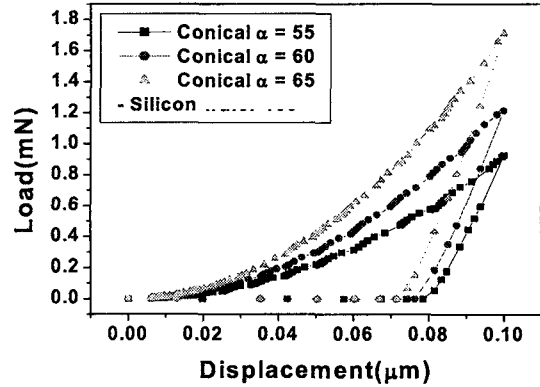


Fig. 14 Load-displacement curves on silicon with different angle of conical tip

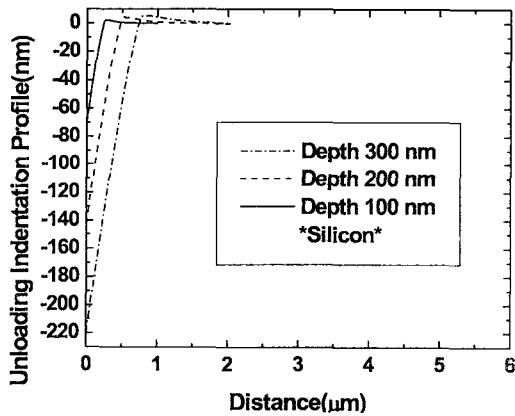


Fig. 13 Indentation profiles on silicon with different indentation depth (Conical tip)

이러한 결과들로 스크래치 공정에 사용할 하중 값과 버의 발생량, 탄성회복을 예측하여 스크래치 공정으로 정밀한 나노패턴 제작시 기초 데이터로 활용할 것이다.

### 3.5 팁 내각 변화에 대한 나노인덴테이션

팁 형상 변화 중 팁 내각은 콘팁을 사용하여 실리콘에 압입시 생기는 탄성회복과 버 예측 해석이다. 팁 내각은 각각 65°, 60°, 55°로 하였으며 압입 깊이는 100 nm로 하여 해석하였다.

Fig. 14의 하중-변위 그래프를 보면 팁 라운드 변화에 대한 나노인덴테이션과 비슷한 경향을 보이고 있고, 팁 내각이 감소할수록 압입 하중이 낮고, 탄성회복량이 적음을 알 수 있다.

Fig. 15는 팁 내각변화에 대한 응력분포를 보여주고 있고, 팁 내각이 작아질수록 팁 주위에 응력이 좁게 집중됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 팁 내각이 감소할수록 접촉면적이 작아지기 때문에 하중이 감소하게 되고, 응력 집중이 팁 주위에서 분산되지 않으므로 소성변형이 점점 커지게 된다. 즉 탄성회복이 감소하게 된다.

Fig. 16은 팁 내각변화에 대한 시편 표면의 버를 프로파일한 그래프이다. 이 결과 내각이 좁아질수록 버의 높이는 증가함을 알 수 있었다. 그러므로 탄성회복과 버 높이의 관계는 반비례 관계임을 알 수 있다.

극미세 패턴 제작시 팁 내각이 적은 것이 탄성회복이 적으므로 적합하겠지만 버의 높이가 증가하기 때문에 적합하지 않은 않다. 그리고 팁은 다이아몬드이기 때문에 결정학적으로 내각이 좁아지면 팁 라운드가 점점 커지게 된다. 내각이 30°이면 팁 라운드는 500 nm 정도로 밖에 제작할 수 없기 때문에 가공한계성을 고려하여 팁을 설계해야 할 것이다<sup>5</sup>. 이러한 결과를 토대로 스크래치 공정을 이용한 나노패턴 제작시 정확한 변형을 예측하여 보다 정밀하고 목적에 맞는 패턴을 제작할 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구는 극미세 패턴 제작시 생기는 시편의 탄성회복이나 버를 나노인덴테이션 유한요소해석으로 예측해보는 기초 연구이다. 다음과 같은 결

론을 얻었다.

- (1) 나노인덴테이션 3D 유한요소해석은 Berkovich 팁을 이용하여 Fused Silica, PMMA, 실리콘에 압입한 실험의 하중-변위 그래프와 AFM 프로파일을 이용하여 해석의 타당성을 검증하였다.
- (2) Berkovich, 콘, 구형 팁과 실리콘, PMMA, 파이렉스 글라스 7740 소재를 이용하여 탄성회복과 버 높이의 차이점을 알아보았다. 그 결과 압입 깊이가 깊고, 팁 라운드가 적으며, 팁 내각이 감소할수록 탄성회복이 작음을 알 수 있었고, 버 높이는 탄성회복에 반비례함을 알 수 있었다.
- (3) 3 차원 나노인덴테이션 공정 해석으로 스크래치 공정시 입력하는 하중, 팁 방향, 탄성회복, 버 높이, 팁 종류 등을 선택할 수 있는 기초 테

이터를 제시하였다.

향후 3차원 스크래치 공정해석 모델을 만들어 정확한 공정 변수를 적용시켜 보다 정밀한 패턴 제작 조건을 조사할 것이다.

### 참고문헌

1. Oliver, W. C., Pharr, G. M., "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," J. Mater. Res., Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, 1992.
2. Han, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., Lee, S. Y., "Principal and Applications of Nanoindentation Test," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 19-26, 2002
3. Ashida, K., Morita, N. and Toshida, Y., "Study on Nano-machining Process using Mechanism of a Friction Force Microscope," JSME International Journal Series C, Vol. 44, No. 1, pp. 51-60, 2001.
4. Hamamaka, H., Ono, T. and Esashi, M., "Fabrication of Self Supported Si Nano-Structure with STM," Proc. IEEE MEMS '97, pp. 153-156, 1997.
5. MTS, Nanoindenter XP Manual, 2002.
6. Lee, J. W., Youn, S. W., Kang, C. G., "Finite Element Analysis of Nano Deformation for the Hyper-fine Pattern Fabrication by using Nanoindentation," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 5, 2003.
7. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, ABAQUS Standard /Explicit rel. 6.2, 2001.
8. Du, B., Mark, R., Vanlandingham, Zhang, Q., He, T., "Direct Measurement of Plowing Friction and Wear of a Polymer Thin Film the Atomic Force Microscope," J. Mater. Res., Vol. 16, No. 5, pp 1487-1492, 2001.
9. Lu, Chung-Jen, Bogy, D. B., "The Effect of Tip Radius on Nano-indentation Hardness Tests," Int. J. Solid Struct., Vol. 32, No. 12, pp. 1759-1770, 1995.
10. Gad-el-Hak, M., The MEMS Handbook, CRC PRESS, pp. 18-11,12, 2001.
11. Knapp, J. A., Follstaedt, D. M., Myers, S. M., Barbour, J. C., Friedmann, T. A., "Finite-Element Modeling of Nanoindentation," Journal of Applied Physics, Vol. 85, No. 3, pp. 1460-1474, 1999.

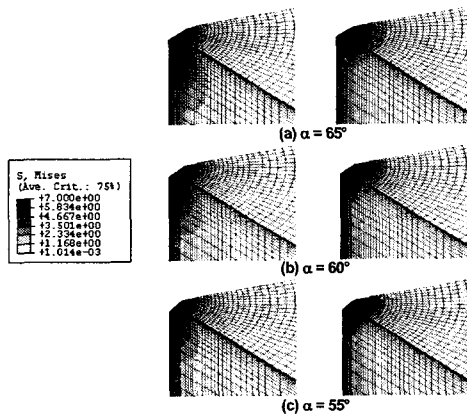


Fig. 15 Von-mises stress distribution on silicon with different angle of conical tip

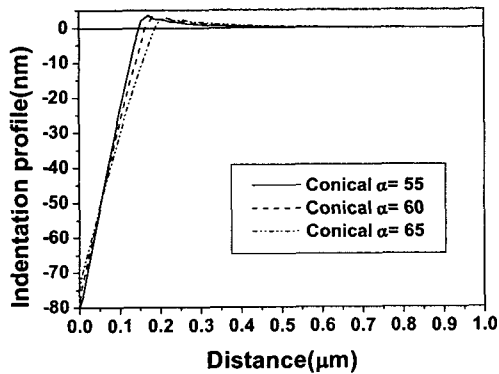


Fig. 16 Indentation profiles on silicon with different angle of conical tip